

А.А. ПЕТКОВ

ФОРМИРОВАНИЕ ИСПЫТАТЕЛЬНЫХ ИМПУЛЬСОВ ТОКА СЛОЖНОЙ ФОРМЫ

У роботі розглянутий вибір параметрів розрядного кола генератора імпульсів струму при формуванні іспитових імпульсів складної форми. Наведено співвідношення, що дозволяють робити такий вибір.

This paper considers the parameters selection of the elements of the discharge circuit of the current pulses generator by formation complex form pulses. The parities allowing to make such selection are resulted.

При испытаниях различного электротехнического и электронного оборудования (ЭЭО), на стойкость к воздействию электромагнитных факторов естественного и искусственного происхождения, широко используются генераторы импульсов тока (ГИТ), создаваемые на базе емкостных накопителей энергии (ЕНЭ). Импульсы тока, генерируемые в разрядной цепи ГИТ, используются либо непосредственно, как воздействующий фактор (например, при исследовании электродинамической и электротермической устойчивости оборудования), либо в качестве фактора, порождающего другие испытательные воздействия (например, импульсное магнитное поле, световой импульс). Такое многообразие областей применения импульсов тока обуславливает широкий спектр требований к их форме (изменению величины тока во времени).

Рассмотрим ряд источников импульсных электромагнитных воздействий (см. рис.1) для имитации которых требуется формировать испытательные импульсы тока.

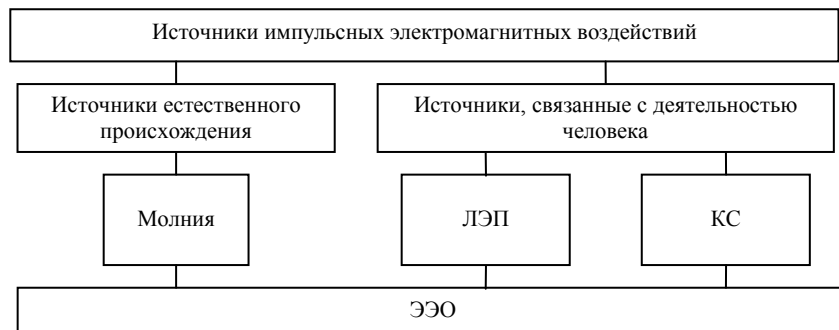


Рис. 1. Основные высокоэнергетичные источники импульсных электромагнитных воздействий, влияющих на работоспособность ЭЭО

Одним из наиболее значимых электромагнитных факторов естественного происхождения, влияющих на работоспособность оборудования, является импульс тока линейной молнии. Воздействию различных эффектов, возникающих при протекании импульса тока молнии, подвергается в той или иной степени практически все ЭЭО, находящееся в зоне грозовой деятельности. Статистический характер параметров импульса тока молнии определяет многообразие аналитических моделей ее формы, наиболее употребляемые из которых приведены в [1]. Для проектирования ГИТ, имитирующих импульсы тока молнии, особое значение имеют модели, представляющие собой экспоненциальный полином. Такая модель имеет ряд преимуществ при анализе процессов, вызванных воздействием тока молнии и синтезе разрядной цепи ГИТ, имитирующих эти токи. В общем случае аналитическое выражение для тока имеет вид

$$i(t) = \sum_{j=1}^n \alpha_j e^{-\beta_j t}, \quad (1)$$

где $\sum_{j=1}^n \alpha_j = 0$; $\beta_j > 0, j = 1 \dots n$; $n \geq 2$.

Чем больше членов содержит полином (1), тем с большей точностью он отражает особенности формы импульса тока молнии. В настоящее время, большинство моделей ограничиваются двумя-тремя членами полинома (1). Требование равенства нулю суммы коэффициентов при экспонентах определяется требованием отсутствия тока в начальный момент – $i(t) = 0$ при $t = 0$, а требование положительности коэффициентов в показателях экспонент – требование полного затухания импульса тока во времени – $i(t) = 0$ при $t = \infty$.

Постоянное возрастание объема производства электроэнергии, модернизация действующих и создание новых сетей ее распределения приводит к необходимости учета влияния различных электромагнитных факторов, сопровождающих эксплуатацию этих сетей, в частности, высоковольтных линий электропередачи (ЛЭП). Существенное воздействие на ЭЭО оказывают токи, протекающие в ЛЭП при коротких замыканиях (к.з.) [2]. В зависимости от вида к.з. протекающие токи имеют различную форму [3]. Для имитации этих токов в испытательных целях их форма может быть в общем случае представлена в виде

$$i(t) = \alpha_1 e^{-\beta_1 t} + \alpha_2 e^{-\beta_2 t} + \alpha_3 e^{-\beta_3 t} \sin(\omega t + \varphi_3) + \alpha_4 e^{-\beta_4 t} \cos(\omega t + \varphi_4), \quad (2)$$

где $\alpha_1 + \alpha_2 + \alpha_3 \sin(\varphi_3) + \alpha_4 \cos(\varphi_4) = 0$; $\beta_1, \beta_2, \beta_3, \beta_4, > 0$.

Связь между коэффициентами в (2) определяется требованиями, оговоренными для выражения (1).

ЭЭО, транспортируемое по электрифицированной железной дороге или расположенное вблизи ее контактных цепей, подвергается электромагнитным воздействиям, обусловленным токами в контактной сети (КС), которые принимают свои наибольшие значения в режиме к.з. Для воспроизведения токов к.з. в КС переменного тока с помощью ГИТ в качестве базовой модели импульса тока может быть использовано выражение (2) с соответствующим выбором коэффициентов.

Протекание описанных выше импульсов тока сопровождается возникновением электромагнитного импульса (ЭМИ), который непосредственно и воздействует на цепи ЭЭО.

Импульсы тока, возникающие в цепях ЭЭО под воздействием ЭМИ описанных выше, в силу ряда физических процессов, связанных с преобразованием энергии, могут иметь еще более сложную форму.

Традиционно для испытания ЭЭО на стойкость к воздействию импульсов тока и ЭМИ существуют определенные международные и государственные нормы, например [4, 5], фиксирующие форму воздействий на ЭЭО. Однако по мере расширения знаний о процессах порождающих импульсы тока и ЭМИ, совершенствования измерительной и регистрирующей аппаратуры, накопления статистических данных, описание форм воздействия будет уточняться в сторону учета его особенностей, т.е. усложнения описания, что, в конечном итоге, позволит при испытаниях максимально приблизиться к отклику ЭЭО на воздействие реальных импульсов тока и ЭМИ.

Таким образом, формирование испытательных импульсов тока сложной формы является актуальной задачей, решение которой позволит обеспечить современный уровень различного рода испытаний ЭЭО. Настоящая работа посвящена вопросу генерирования импульсов тока сложной формы в разрядной цепи ГИТ с использованием формирующих двухполюсников (ФД).

Рассмотрим разрядную цепь ГИТ (рис. 2) содержащую ФД. Требуется выбрать структуру и величины параметров ФД таким образом, чтобы в нагрузке протекал импульс тока заданной формы.

Данная задача может быть решена методами синтеза электрических цепей, использование которых предусматривает нахождение операторного сопротивления ФД, которое далее представляется набором составляющих, соответствующих операторным изображениям R, L и C элементов [6].

Процедура нахождения операторного сопротивления ФД включает в себя определение операторного изображения импульсов тока. Можно показать, что операторное изображение импульсов тока, описываемых выражениями (1) и (2), представимо в виде отношения двух полиномов

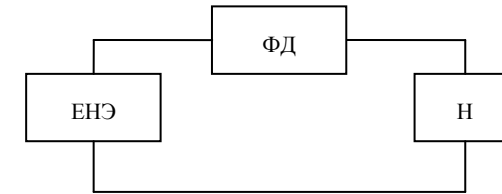


Рис. 2. Разрядная цепь ГИТ с ФД.

ЕНЭ – емкостной накопитель энергии, ФД – формирующий двухполюсник, Н – нагрузка

$$i(p) = \sum_{k=0}^{m-2} p^k A_k / \sum_{k=0}^m p^k B_k, \quad (3)$$

где $m \geq 2$.

Коэффициенты полиномов операторного изображения (3) определяются видом зависимости для импульса тока во временной области и могут быть вычислены по следующим соотношениям.

Для импульса тока вида (1)

$$i(t) = \sum_{j=1}^m \alpha_j \cdot e^{-\beta_j t} \Leftrightarrow \sum_{k=0}^{m-2} p^k \cdot A_k / \sum_{k=0}^m p^k \cdot B_k, \quad (4)$$

$$\text{где } \sum_{j=1}^m \alpha_j = 0; \quad \beta_j > 0, j = 1 \dots m;$$

m - степень полинома знаменателя, численно равная количеству слагаемых экспоненциального полинома.

Для m = 2:

$$i(t) = \alpha_1 \cdot e^{-\beta_1 t} + \alpha_2 \cdot e^{-\beta_2 t} \Leftrightarrow \frac{A_0}{p^2 + B_1 p + B_0}, \quad (5)$$

где $\alpha_1 + \alpha_2 = 0$; $A_0 = \alpha_1 \beta_2 + \alpha_2 \beta_1$; $B_1 = \beta_1 + \beta_2$; $B_0 = \beta_1 \beta_2$.

Для m = 3:

$$i(t) = \alpha_1 \cdot e^{-\beta_1 t} + \alpha_2 \cdot e^{-\beta_2 t} + \alpha_3 \cdot e^{-\beta_3 t} \Leftrightarrow \frac{A_1 p + A_0}{p^3 + B_2 p^2 + B_1 p + B_0}, \quad (6)$$

где $\alpha_1 + \alpha_2 + \alpha_3 = 0$;

$A_1 = \alpha_1(\beta_2 + \beta_3) + \alpha_2(\beta_1 + \beta_3) + \alpha_3(\beta_1 + \beta_2)$; $A_0 = \alpha_1\beta_2\beta_3 + \alpha_2\beta_1\beta_3 + \alpha_3\beta_1\beta_2$;

$B_2 = \beta_1 + \beta_2 + \beta_3$; $B_1 = \beta_1 \cdot \beta_2 + \beta_1 \cdot \beta_3 + \beta_2 \cdot \beta_3$; $B_0 = \beta_1 \cdot \beta_2 \cdot \beta_3$.

В общем случае:

$$A_k = \sum_{v=1}^m \sum_{\substack{j_1=1 \\ j_1 \neq v}}^{k+2} \sum_{\substack{j_2=j_1+1 \\ j_2 \neq v}}^{k+3} \dots \sum_{j_{n-k}=j_{n-k-1}+1}^m \alpha_v \beta_{j_1} \beta_{j_2} \dots \beta_{j_{n-k}}; \quad k = \overline{0, m-2};$$

$$B_k = \sum_{j_1=1}^{k+1} \sum_{j_2=j_1+1}^{k+2} \sum_{j_3=j_2+1}^{k+3} \dots \sum_{j_{n-k}=j_{n-k-1}+1}^n \beta_{j_1} \beta_{j_2} \beta_{j_3} \dots \beta_{j_{n-k}}, \quad k = 0, m-1; \quad (7)$$

$B_m = 1$.

Для некоторых частных случаев импульса тока вида (2) их операторное изображение представимо следующим образом:

для $m=2$:

$$i(t) = \alpha e^{-\beta t} \sin(\omega t) \Leftrightarrow \frac{A_0}{p^2 + B_1 p + B_0}, \quad (8)$$

где $A_0 = \omega \alpha$

$B_1 = 2\beta$;

$B_0 = \beta^2 + \omega^2$.

для $m=3$:

$$i(t) = \alpha_1 e^{-\beta_1 t} + \alpha_2 e^{-\beta_2 t} \sin(\omega t) + \alpha_3 e^{-\beta_2 t} \cos(\omega t) \Leftrightarrow \frac{A_1 p + A_0}{p^3 + B_2 p^2 + B_1 p + B_0}, \quad (9)$$

где $\alpha_1 + \alpha_3 = 0$;

$A_1 = 2\alpha_1\beta_2 + \alpha_2\omega + \alpha_3(\beta_1 + \beta_2)$; $A_0 = \alpha_1(\beta_2^2 + \omega) + \alpha_2\beta\omega_1 + \alpha_2\omega + \alpha_3\beta_1\beta_2$;

$B_2 = \beta_1 + 2\beta_2$; $B_1 = 2\beta_1\beta_2 + \beta_2^2$; $B_0 = \beta_1\beta_2^2$.

для $m=4$:

$$i(t) = \delta_1 e^{-\gamma_1 t} \sin(\omega t + \varphi_1) + \delta_2 e^{-\gamma_2 t} \cos(\omega t + \varphi_2) \Leftrightarrow \frac{p^3 M_3 + p^2 M_2 + p M_1 + M_0}{p^4 N_4 + p^3 N_3 + p^2 N_2 + p N_1 + N_0}, \quad (10)$$

где $M_3 = \delta_1 \sin \varphi_1 + \delta_2 \cos \varphi_2 = 0$;

$M_2 = 2\gamma_2 \delta_1 \sin \varphi_1 + \delta_1 \gamma_1 \sin \varphi_1 + \delta_1 \omega \cos \varphi_1 + 2\gamma_1 \delta_2 \cos \varphi_2 + \delta_2 \gamma_2 \cos \varphi_2 - \delta_2 \omega \sin \varphi_2$;

$M_1 = \delta_1 (\gamma_2^2 + \omega^2) \sin \varphi_1 + 2\gamma_2 (\delta_1 \gamma_1 \sin \varphi_1 + \delta_1 \omega \cos \varphi_1) + \delta_2 (\gamma_1^2 + \omega^2) \cos \varphi_2 + 2\gamma_1 (\delta_2 \gamma_2 \cos \varphi_2 - \delta_2 \omega \sin \varphi_2)$;

$M_0 = (\delta_1 \gamma_1 \sin \varphi_1 + \delta_1 \omega \cos \varphi_1) (\gamma_2^2 + \omega^2) + (\delta_2 \gamma_2 \cos \varphi_2 - \delta_2 \omega \sin \varphi_2) (\gamma_1^2 + \omega^2)$.

Можно показать, что для схемы, приведенной на рис. 2, при нагрузке, состоящей из последовательно соединенных R и L элементов, операторное сопротивление ФД имеет вид

$$Z_{\Phi D}(p) = \sum_{k=0}^m p^k W_{0,k} / \sum_{k=1}^{m-1} p^k V_{1,k}, \quad (11)$$

где m - коэффициент операторного изображения тока в выражении (3);

$W_{0,k}$, $V_{1,k}$ - коэффициенты операторного сопротивления, зависящие от параметров разрядной цепи.

Для коэффициентов $W_{0,k}$ и $V_{1,k}$ имеют место следующие соотношения

$$W_{0,k} = U \cdot C \cdot B_k - \sum_{\substack{i=0 \\ 0 \leq j=k-i \leq 2}}^{m-2} A_i F_j, \quad (12)$$

$$V_{1,k} = C \cdot A_{k-1}, \quad (13)$$

где m , A_i , B_k - коэффициенты операторного изображения импульса тока; U , C - зарядное напряжение и емкость ЕНЭ; $F_0 = 1$; $F_1 = RC$; $F_2 = LC$; R - сумма активных сопротивлений нагрузки и цепи ЕНЭ; L - сумма индуктивностей нагрузки и цепи ЕНЭ.

Проводя анализ, основанный на методах теории электрических цепей [6], можно показать, что операторное сопротивление вида (3) является операторным сопротивлением двухполюсника, показанного на рис.3.

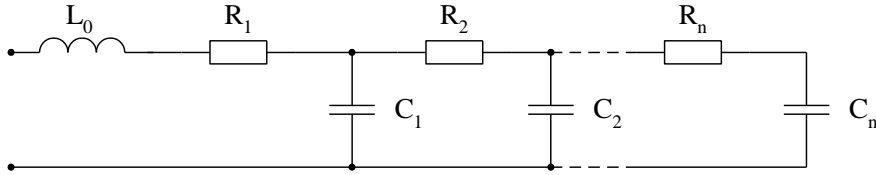


Рис. 3. Структура ФД

Двухполюсник состоит из начального звена, представленного индуктивностью L_0 и ряда RC звеньев, количество которых n связано с коэффициентом операторного изображения тока m следующим образом $n = m - 1$. Величина индуктивности начального звена ФД определяется из выражения

$$L_0 = W_{0,v+1} / V_{1,v}, \quad (14)$$

где $W_{0,v+1}$, $V_{1,v}$ - определяются из соотношений (12, 13);

$v = m - 1$;

m - коэффициент операторного изображения тока.

Параметры последующих звеньев определяются из соотношений:

$$R_j = W_{j,v-j+1} / V_{j,v-j+1}, \quad (15)$$

$$C_j = V_{j,v-j+1} / W_{j+1,v-j}, \quad (16)$$

где $j = \overline{1, n}$ - номер звена;

n - количество звеньев в структурной схеме ФД;

$W_{j,0} = W_{0,0}$, $j = \overline{1, v}$;

$W_{1,1} = W_{1,0}$;

$$W_{1,k} = W_{0,k} - W_{0,v+1} \frac{V_{1,k-1}}{V_{1,v}}, \quad k = \overline{2, v}.$$

Остальные коэффициенты определяются по рекуррентным соотношениям:

$$W_{j,k} = W_{j-1,k} - W_{j-1,v-j+2} \frac{V_{j-1,k}}{V_{j-1,v-j+2}}, \quad j = \overline{2, v}, \quad k = \overline{1, v-j+1};$$

$$V_{j,k} = V_{j-1,k} - V_{j-1,v-j+2} \frac{W_{j,k-1}}{W_{j,v-j+1}}, \quad j = \overline{2, v}, \quad k = \overline{1, v-j+1};$$

Соотношения для вычисления значений параметров элементов ФД получены исходя из общих принципов синтеза электрических цепей. Для обеспечения физической реализуемости этих элементов необходимы дополнительные условия, которые приведены в табл.

Таблица
Условия обеспечения формирования импульсов тока в схеме ГИТ с одним ЕНЭ и ФД, включенным последовательно с нагрузкой

Форма импульса тока	Область реализации	
	Условия для U	Условия для коэффициентов формы импульса тока
$\alpha_1 e^{-\beta_1 t} + \alpha_2 e^{-\beta_2 t}$	$U \geq U^*$ $U^* > 0$	$\alpha_1 > 0; \alpha_2 = -\alpha_1; \beta_1 \beta_2 > 0;$ $\beta_1 < \beta_2$
$\alpha e^{-\beta t} \sin(\omega t)$		$\alpha, \beta, \omega > 0$
$\alpha_1 e^{-\beta_1 t} + \alpha_2 e^{-\beta_2 t} + \alpha_3 e^{-\beta_3 t}$ $\alpha_1 e^{-\beta_1 t} + \alpha_2 e^{-\beta_2 t} \sin(\omega t) + \alpha_3 e^{-\beta_2 t} \cos(\omega t)$		$A_1 B_2 - A_0 B_3 > 0$ $A_0^2 B_3 - A_0 A_1 B_2 + A_1^2 B_1 > 0$ $A_0 B_3 - A_0^2 A_1 B_2 + A_0 A_1^2 B_1 - A_1^3 B_0 > 0$

Примечания:

1. U^* - пороговое значение зарядного напряжения ЕНЭ, определяется из условия положительности коэффициентов $W_{i,j}$ и $V_{i,j}$ в выражениях (12) и (15, 16).

2. Коэффициенты A_i , $i = \overline{0, 1}$; B_j , $j = \overline{0, 3}$ определяются в соответствии (6) и (9).

Примеры выбора параметров разрядной цепи ГИТ с использованием данной методики приведены в работах [7, 8]. Автором в [7] рассмотрен вопрос выбора величины параметров разрядной цепи ГИТ при задании импульса тока в виде суммы двух экспонент. Приведены соотношения, обеспечивающие выбор параметров как для вновь сооружаемых ГИТ, так и

при переводе функционирующих ГИТ на генерирование импульсов тока с новой формой импульса и/или новой нагрузкой. В [8] приведены соотношения, обеспечивающие выбор параметров разрядной цепи ГИТ при задании импульса тока суммой трех экспонент. Рассматривается вопрос оптимального выбора параметров схемы формирования при заданной форме импульсов тока.

Выводы.

1. Проведенный анализ литературных источников подтверждает необходимость исследований в направлении формирования испытательных импульсов сложной формы.

2. Показана возможность формирования импульсов тока сложной формы в разрядной цепи ГИТ посредством введения в неё двухполюсника. Определена его структура. Предложены соотношения для выбора величины элементов двухполюсника. Указаны условия физической реализуемости элементов двухполюсника.

3. Приведенные материалы являются основой для проведения дальнейших исследований, в частности, исследования возможности минимизации энергии, запасаемой в ЕНЭ, при формировании импульсов тока сложной формы.

Список литературы: 1. *Кравченко В.И.* Грозозащита радиоэлектронных средств. - М.: Радио и связь, 1991. – 264 с. 2. *Кравченко В.И., Болотов Е.А., Летунова Н.И.* Радиоэлектронные средства и мощные электромагнитные помехи. – М.: Радио и связь, 1987. – 256 с. 3. *Левинштейн М.Л.* Операционное исчисление в задачах электротехники. – Л.: Энергия. 1972. – 360 с. 4. IEC 61312-1: 1995. Protection against Lightning Electromagnetic Impulse. Part 1: General Principles. 5. ГОСТ 30585-98. Совместимость технических средств электромагнитная. Стойкость к воздействию грозовых разрядов. Технические требования и методы испытаний. Минск. 1998. - 28 с. 6. *Карни Ш.* Теория цепей. Анализ и синтез. - М.: Связь, 1973. - 368 с. 7. *Петков А.А.* Выбор параметров разрядной цепи генератора импульсов тока при разряде на последовательную активно-индуктивную нагрузку // Электротехника. – 1990. - №10. – С. 35-36. 8. *Воронина З.А., Колущко Г.М., Межибовский Г.Л., Петков А.А.* К расчету высоковольтных устройств, формирующих импульсы тока (напряжения) сложной формы. - Харьков: Харьковский политехнический институт, 1985. - 16 с. Деп. в УкрНИИНТИ 04.12.85, №2665-Ук.85.

Поступила в редколлегию 10.07.03